粗糙集聚类分析对姜黄属植物数值分类的研究

王正德[1],秦毓茜[2],杜敏华[1],庞发虎[1],杜瑞卿[1]
(1 南阳师范学院 生物系,河南 南阳 473061;2 南阳理工学院,河南 南阳 473061)

[摘 要] 为了为姜黄属植物分类与中药鉴定提供新的参考,以姜黄属(*Curcuma* L.)的 31 个材料为研究对象,把 47 项分类性状(指标)分解为 28 个定性指标和 19 个定量指标,将 28 个定性指标进一步分解为二元性状指标和三元性状指标,然后各自进行粗糙集理论的处理和聚类,把聚类结果按交集分类的办法形成定性指标综合分类的结果;将 19 个定量指标进行粗糙集理论的处理和聚类,把聚类结果与定性指标的分类结果按交集分类的办法形成 20 项指标综合分类的结果。结果表明,将定性性状指标分类集与定量性状指标分类集进行交集分类,姜黄属植物的 31 个材料可分为 10 个类群(种);这与前人采用 47 项指标一次性完全聚类的结果存在差异,与传统分类也不完全相同。说明粗糙集理论对于分类指标的处理,一方面去掉了对分类没有显著作用的指标,减少了运算;另一方面减少了不必要指标对分类的影响,使分类更为准确。

[关键词] 粗糙集;聚类分析;姜黄属;数值分类
[中图分类号] S567 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2007)11-0203-10

Study on numerical taxonomy of Curcuma L. by rough-set theory and cluster analysis

WANG Zheng-de[1], QIN Yu-qian[2], DU Min-hua[1], PANG Fa-hu[1], DU Rui-qing[1]
(1 *Department of Biology, Nanyang Normal University, Nanyang, He'nan* 473061, *China;*
2 *Nanyang Institute of Technology, Nanyang, He'nan* 473061, *China*)

Abstract: To provide new evidences for the classification and medicinal identification of *Curcuma* L. 31 (OTU) kinds of *Curcuma* L. were studied in this paper. 47 taxonomy characters were decomposed to 28 qualitative index and 19 quantitative index, and the qualitative characters were further decomposed to two-state characters and three-state characters, then treated by rough-set theory and clustered, respectively. The results of cluster analysis were divided into qualitative index synthesis taxonomy by intersection taxonomy. 19 quantitative characters were treated by rough-set theory and cluster analysis, and the results were classified into 20 kinds of character synthesis taxonomy by intersection taxonomy, then synthesized into 10 major kinds. The results were compared with principal 47 taxonomy characters by component and cluster analysis for made by Xiao xiao-he. The study showed that it was reasonable and accurate to decompose taxonomy character, and combining rough-set theory with cluster analysis was significant.

Key words: rough-set theory; cluster analysis; *Curcuma* L.; numerical taxonomy

姜科姜黄属(*Curcuma* L.)植物全世界约 70 种,主要分布于亚洲热带和亚热带地区。我国约 20 个分类群(含种、亚种、变种和栽培变种),分布于东南至西南部。该属多种植物为传统中药材,具有重

*[收稿日期] 2006-10-27
[基金项目] 南阳市科技攻关项目(2005PT064);南阳师范学院资助项目
[作者简介] 王正德(1963-),男,河南邓州人,副教授,学士,主要从事资源植物保护与利用研究。E-mail:zhengde63@tom.com

要的经济价值[1]。由于该属植物分布广,栽培品种多,形态变异大,大部分种类带花果标本又不易采到,因而该属植物系统分类与中药品种鉴定一直很困难。由于传统分类方法的困惑,肖小河等[2]采用 47 项定性和定量指标,对国产姜黄属植物进行了较系统的分类整理,并将其分为 11 个类群(种)。但是,植物分类的指标(性状)有定性指标和定量指标,定性指标没有数量,只有性状级别的编码,而编码大小不仅无数值意义,而且是随意的。在许多研究中应用主成分分析、聚类分析时,把定性指标和定量指标组合在一起进行运算分析[3],这既不合理,又不科学,会直接导致分类结果的不正确性。在对一定数目的对象进行分类时,分类指标的选择主要是看其对分类的重要性,而不在于分类指标越多越好,相反分类指标过多会影响分类。粗糙集理论是一门研究和处理不精确性的新兴学科[4],它无需提供处理问题数据集合之外的任何先验知识,这也是它与模糊数学理论最主要的区别。粗糙集理论提供了严格的数学理论方法,无论是数学运算过程还是分析方法都体现了客观性和整体联系性的特点[5]。本研究将姜黄属植物的 47 项指标分为定性指标和定量指标两大类,对每一类首先用粗糙集理论进行运算,然后再分别进行聚类分析,最后将各自的聚类结果进行合并,形成 47 项综合分类结果,并与前人的研究结果进行比较,旨在为姜黄属植物数值分类以及生物的数值分类提供新的思路和方法。

1 材料与方法

1.1 材 料

分类材料为我国姜黄属 16 个主要分类群及其不同产地居群和主产区大中小植株群体,共计 31 个材料(表 1)[2]。

1.2 观测项目

试验观察和测量了各主产区和有关植物园的活体标本,以及本研究初步建立的中国姜黄属药用植物种质资源库的全部材料,同时参考了中国科学院华南植物研究所、中国科学院昆明植物研究所、中国科学院成都生物研究所、中国科学院植物研究所、中国科学院广西植物研究所、广西药用植物园及四川省中药研究所等单位的部分腊叶标本[6-8]。以姜黄属植物 31 个材料作分类运算单位(OTU),选取其 47 个分类性状(指标),其中二元性状(two-statc character)和三元(多态)性状定性(three-statc character for qualitative multistate)指标 28 个,定量指标 19 个,性状编码含义及取值[2]见表 2~5。

1.3 粗糙集理论

粗糙集理论与方法作为一门数学学科,因其特有的原理、公式和符号等较为复杂[10],故在此不再加以阐述,只结合本研究对象进行文字性简述。

1.3.1 等价关系的划分[11] 将 31 个姜黄属植物构成的集合 U 称为论域。11 项二元性状定性指标和 17 项三元性状定性指标构成等价关系族 R_1 和 R_2,每一个指标为一个等价关系。$U=\{e_1,e_2,e_3,\cdots,e_{31}\}$,$R_1=\{H_3,H_{12},H_{16},H_{17},H_{19},H_{30},H_{36},H_{37},H_{44},H_{46},H_{47}\}$,$R_2=\{H_1,H_2,H_5,H_6,H_7,H_8,H_{13},H_{14},H_{15},H_{20},H_{21},H_{25},H_{28},H_{29},H_{32},H_{39},H_{40}\}$,设集合 P 属于集合 R_1,即 $P\subseteq R_1$ 且 $P\neq\Phi$,则 $\cap P$(P 中所有等价关系的交集)也是一个等价关系,称为 P 的不可区分关系,记为 ind(P)(等价关系族),利用等价关系和等价关系族对 U 进行划分后形成若干子集。例如,可利用 H_1 划分,也可利用 $P=\{H_1,H_2,H_5\}$划分,记为 U/H_1(或 U/P)。

1.3.2 上近似集与下近似集 利用某个等价关系,如 H_1(或某个等价关系族,如 P)对 U 进行划分后形成若干子集,如果子集元素肯定属于某类群,如 3 类群,就称 3 类群的 H_1(或 P)下近似集;如果子集元素可能属于某类群,如 3 类群,就称 3 类群的 H_1(或 P)上近似集。

1.3.3 知识约简[10] 利用不同的等价关系族,如 $P_1=\{H_5,H_6\}$,$P_2=\{H_5,H_6,H_7\}$,$P_3=\{H_5,H_6,H_7,H_8\}$分别对 U 进行划分,如果 P_2 划分结果与 P_3 划分结果完全相同,则 H_8 是不必要属性;如果 P_1 划分结果与 P_2 划分结果不相同,则 H_7 是必要属性;如果 P_2 中每个属性均是必要的,则 P_2 是一个约简。令表 1 中的 16 个分类群为决策属性 D,如果 P_1 划分的子集能够分别属于 D 的子集,则称 H_7 为 D 的相对不必要属性,否则 H_7 为 D 的相对必要属性,记为 $POS_{ind(\underline{P_1})}^{(ind(D))}=POS_{ind(\underline{P_2-(H_7)})}^{(ind(D))}$;如果 P_2 中每一个属性均是 D 的相对必要属性,则称 P_1 为 D 的一个相对约简,D 可能有多个相对约简,所有相对约简共有的属性称为核。

以上约简的求解过程是通过对每一个对象的每一个属性赋予一个信息值,形成信息表,然后通过布尔函数运算。可由 △的极小析取范式求出所有约简。

在 11 项二元性状定性指标和 17 项三元性状定性指标中,每个对象、每个属性赋予的一个信息值即为它们的性状编码。

表 1　用于形态数值分类的 31 个姜黄属植物材料的基本情况

Table 1　31(OUT) kinds of plants of *Curcuma* L. for modality numerical taxonomy

编号 No.	分类群 Taxonomical population	植物学名 Name of plant	材料产地及来源 Material producing area	居群或群体类型 Population
1	1	广西莪术 *C. kwangsiensis*	广西横县(道地产区) Guangxihengxian (typical producing area)	大植物群体 Big plant population
2		广西莪术 *C. kwangsiensis*	广西横县(道地产区) Guangxihengxian (typical producing area)	中植株群体 Medium plant population
3		广西莪术 *C. kwangsiensis*	广西横县(道地产区) Guangxihengxian(typical producing area)	小植株群体 Small plant population
4	2	紫脉莪术 *C. kwangsiensis* var. affini	广西横县(道地产区) Guangxihengxian (typical producing area)	变种 Mutation
5		毛莪术 *C. kwangsiensis* var. puberula	广西横县(道地产区) Guangxihengxian(typical producing area)	变种 Mutation
6		广西莪术 *C. kwangsiensis*	华南植物园 South China botanical garden	非道地居群 Non-typical population
7	3	蓬莪术 *C. phaeocaulis*	四川双流(道地产区) Sichuanshuangliu(typical producing area)	大植株群体 Big plant population
8		蓬莪术 *C. phaeocaulis*	四川双流(道地产区) Sichuanshuangliu(typical producing area)	中植株群体 Medium plant population
9		蓬莪术 *C. phaeocaulis*	四川双流(道地产区) Sichuanshuangliu(typical producing area)	小植株群体 Small plant population
10		蓬莪术 *C. phaeocaulis*	华南植物园 South China botanical garden	非道地居群 Non-typical population
11		蓬莪术 *C. phaeocaulis*	广西药用植物园 Guangxi medical plants garden	非道地居群 Non-typical population
12	4	温郁金 *C. wenyujin*	浙江瑞安(道地产区) Zhejiangruian(typical producing area)	大植株群体 Big plant population
13		温郁金 *C. wenyujin*	浙江瑞安(道地产区) Zhejiangruian (typical producing area)	中植株群体 Medium plant population
14		温郁金 *C. wenyujin*	浙江瑞安(道地产区) Zhejiangruian (typical producing area)	小植株群体 Small plant population
15		温郁金 *C. wenyujin*	华南植物园 South China botanical garden	非道地居群 Non-typical population
16	5	毛郁金 *C. aromatica*	广西药用植物园 Guangxi medical plants garden	非道地居群 Non-typical population
17	6	姜黄 *C. longa*	四川双流(道地产区) Sichuanshuangliu(typical producing area)	大植株群体 Big plant population
18		姜黄 *C. longa*	四川双流(道地产区) Sichuanshuangliu(typical producing area)	中植株群体 Medium plant population
19		姜黄 *C. longa*	四川双流(道地产区) Sichuanshuangliu(typical producing area)	小植株群体 Small plant population
20		姜黄 *C. longa*	华南植物园 South China botanical garden	非道地居群 Non-typical population
21		姜黄 *C. longa*	广西药用植物园 Guangxi medical plants garden	非道地居群 Non-typical population
22	7	川郁金 *C. sichuanensis*	广西药用植物园 Guangxi medical plants garden	非道地居群 Non-typical population
23	8	川郁金 *C. chuanyujin*	四川双流(道地产区) Sichuanshuangliu(typical producing area)	混合植株群体 Hybrid plant population
24	9	细莪术 *C. exigua*	华南植物园(原产四川) South China botanical garden(Sichuan of origin)	混合植株群体 Hybrid plant population
25	10	黄莪术 *C. zedoaria*	华南植物园(原产美国) South China botanical garden(America of origin)	混合植株群体 Hybrid plant population
26	11	印尼莪术 *C. xanthorrhiza*	华南植物园(原产印尼) South China botanical garden (Indonesia of origin)	混合植株群体 Hybrid plant population
27	12	顶花莪术 *C. yunnanensis*	华南植物园(原产云南) South China botanical garden(Yunnan of origin)	混合植株群体 Hybrid plant population
28	13	白顶莪术 *C. albicoma*	昆明植物研究所 Kunming Institute of Botany	混合植株群体 Hybrid plant population
29	14	黄花姜黄 *C. flaviflora*	昆明植物研究所 Kunming Institute of Botany	混合植株群体 Hybrid plant population
30	15	极苦姜黄 *C. amarissima*	昆明植物研究所 Kunming Institute of Botany	混合植株群体 Hybrid plants population
31	16	大莪术 *C. elata*	昆明植物研究所 Kunming Institute of Botany	混合植株群体 Hybrid plant population

表 2 姜黄属植物数值分类性状及编码

Table 2 Numerical taxonomy of character and code for *Curcuma* L.

编号 Number	分类性状 Taxonomic characters	质量性状编码和数量性状的含义 Coding of quality character and meaning of the quantitative traits
H_1	生活状况 Living conditions	1. 野生 Wild;2. 栽培 Cultivation;3. 野生兼栽培 Wild and cultivation
H_2	分布海拔(m) Distribution elevation	1. 400;2. 400～800;3. 800
H_3	分布区类型 Distribution types	按吴征镒教授之 15 大区系类型划分[9] Division by 15 regional-type of professor Wu Zhengyi
H_4	植株高度(m) Plant height	按居群或标本实测平均值计 Calculated by measured average of populations or specimens
H_5	主根茎发达程度 Degree of main root-stock developed	1. 欠发达 Underdeveloped;2. 较发达 More developed;3. 很发达 Advanced
H_6	侧根茎发达程度 Degree of side root-stock developed	1. 欠发达 Underdeveloped;2. 较发达 More developed;3. 很发达 Advanced
H_7	根茎断面颜色 Ccolor of roots section	1. 黄色 Yellow;2. 灰白色 Greyish;3. 黑褐色 Black-brown
H_8	块根发达程度 Degree of roots developed	1. 欠发达 Underdeveloped;2. 较发达 More developed;3. 很发达 Advanced
H_9	叶片长(cm) Length of leaf	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{10}	叶片宽(cm) Breadth of leaf	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{11}	叶片长/ 叶片宽 Length of leaf / the breadth of leaf	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{12}	叶中脉处有无紫红晕 Whether there is purple red in leaf veins	1. 无 No;2. 有 Yes
H_{13}	叶先端形状 Shape of leaf tip	1. 细尾状渐尖 Gradually sharpening like fine caudat;2. 短渐尖 Short gradually sharpening;3. 近弧形 Near camber
H_{14}	叶基部形状 Shape of leaf base	1. 基部渐狭 Gradually narrow in base;2. 基部楔形 Wedge in base;3. 基部近截形 Near linear in base
H_{15}	叶片有无披毛及程度 Whether there is availability and extent of the regional capital in leaf	1. 无 No;2. 毛稀疏 Sparse;3. 毛密集 Intensive
H_{16}	叶鞘颜色 Color of sheath	1. 绿色 Green;2. 紫红色 Purple red
H_{17}	叶鞘有无毛 Whether there is regional capital in sheath	1. 无 No;2. 有 Yes
H_{18}	叶柄长(cm) Length of petiole	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{19}	叶柄颜色 Color of petiole	1. 绿色 Green;2. 淡紫红色 Light purple red
H_{20}	花序抽出时序 Inflorescence out sequencers	1. 先于叶 Grow before leaf;2. 与叶同时 Grow the same as leaf;3. 后于叶 Grow after leaf
H_{21}	花序抽出位置 Position of the inflorescence	1. 从叶鞘抽出 From sheath;2. 从根茎抽出 From root;3. 二者均有 Both
H_{22}	花序长度(cm) Length of inflorescence	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{23}	花序直径(cm) Diameter of inflorescence	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{24}	总花序梗长(cm) Length of total inflorescence caulis	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{25}	鳞片有无及颜色 Availability and color scales	1. 无鳞片 No;2. 绿色 Green;3. 淡紫红色 Light purple red
H_{26}	苞片长度(cm) Length of bract	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{27}	苞片宽度(cm) Width of bract	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{28}	下部苞片颜色 Color of lower bract	1. 淡绿色 Light green;2. 白色 White;3. 淡紫红 Light purple red
H_{29}	上部苞片斑点颜色 Color of upper part bract	1. 无 No;2. 淡红色 Light red;3. 紫红色 Purple red
H_{30}	苞片有无毛 Whether there is regional capital in bract	1. 无 No;2. 有 Yes
H_{31}	不育苞片长(cm) Length of sterile bract	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{32}	不育苞片斑点颜色 Color of dot sterile bracts	1. 无 No;2. 白色 White;3. 淡紫红色 Light purple red
H_{33}	小苞片有无及长度(cm) Availability of small bract length	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{34}	花萼管长度(cm) Length of calyx tube	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{35}	花萼管顶裂齿数 Top crack teeth of the calyx tube	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{36}	花萼有无毛 Whether there is regional capital in calyx	1. 无 No;2. 有 Yes
H_{37}	花冠筒有无毛 Whether there is regional capital in corolla tube	1. 无 No;2. 有 Yes
H_{38}	花冠筒长(cm) Length of corolla tube	按平均实测值计 Calculated by measured average

续表 2　Continued of table 2

编号 Number	分类性状 Taxonomic characters	质量性状编码和数量性状的含义 Coding of quality character and meaning of the quantitative traits
H_{39}	花冠筒颜色 Color of corolla tube	1. 白色 White;2. 黄色 Yellow;3. 紫红色 Purple red
H_{40}	花冠裂片颜色 Color of corolla lamination	1. 白色 White;2. 黄色 Yellow;3. 紫红色 Purple red
H_{41}	花冠侧裂片长(cm) Length of corolla side lamination	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{42}	花冠背裂片长(cm) Length of corolla back lamination	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{43}	退化雄蕊长(cm) Length of stamen degradation	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{44}	退化雄蕊颜色 Color of stamen degradation	1. 白色至淡黄色 From white to light yellow;2. 黄色至深黄色 Form yellow to heavy yellow
H_{45}	唇瓣长(cm) Length of lip petal	按平均实测值计 Calculated by measured average
H_{46}	唇瓣颜色 Color of lip petal	1. 白色至淡黄色 From white to light yellow;2. 黄色至深黄色 Form yellow to heavy yellow
H_{47}	花期 Florescence	1. 春夏(3～6 月) Spring and summer(March-June);2. 夏秋(7～9 月) Summer and autumn(July-September)

表 3　姜黄属植物数值分类的二元性状定性指标信息值

Table 3　Information value of two-state character for numerical taxonomy qualitative character for *Curcuma* L.

分类运算单位 OUT	性状编号 Character number										
	H_3	H_{12}	H_{16}	H_{17}	H_{19}	H_{30}	H_{36}	H_{37}	H_{44}	H_{46}	H_{47}
1	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
2	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
3	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
4	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1
5	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
6	2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
7	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1
13	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1
14	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1
15	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1
16	2	1	1	2	1	2	2	2	2	1	1
17	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2
18	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2
19	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2
20	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2
21	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2
22	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2
23	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1
24	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2
25	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1
26	1	2	1	1	1	1	1	1	11	1	
27	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
28	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2
29	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1
30	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	1	1	1	2	1		1	1	1	1	1

注:H_3 在本研究中只有两大区系类型:15 和 7,所以编码为 2 和 1。

Note: Two types of H_3 Flora in this paper is studied: number 15 and 7, its code is 2 and 1.

表 4 姜黄属植物数值分类的三元性状定性指标信息值

Table 4 Information value of three-state character for numerical taxonomy qualitative character for *Curcuma* L.

分类运算单位 OTU	性状编号 Character number																
	H_1	H_2	H_5	H_6	H_7	H_8	H_{13}	H_{14}	H_{15}	H_{20}	H_{21}	H_{25}	H_{28}	H_{29}	H_{32}	H_{39}	H_{40}
1	2	1	2	2	1	2	2	1	3	2	3	3	1	1	2	1	3
2	2	1	2	2	1	2	2	1	3	2	3	3	1	1	2	1	3
3	2	1	2	2	1	2	2	1	3	2	3	3	1	1	2	1	3
4	2	1	2	2	1	2	2	1	3	2	3	3	1	1	2	1	3
5	2	1	2	2	1	2	2	1	3	2	1	3	1	1	2	1	3
6	1	3	2	2	1	1	2	1	3	2	2	3	1	1	2	2	3
7	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	3	3	2	2	2	1
8	2	2	3	2	2	2	2	1	2	1	3	3	3	2	2	2	1
9	2	2	3	2	2	1	2	1	2	1	2	3	3	2	2	2	1
10	3	2	3	2	2	1	2	1	2	1	2	3	3	2	2	2	1
11	3	3	3	2	2	1	2	1	2	1	2	3	3	2	2	2	1
12	2	1	3	2	2	3	2	2	1	2	2	1	2	2	2	1	3
13	2	1	3	2	2	3	2	2	1	2	2	1	2	2	2	1	3
14	2	1	3	2	2	3	2	2	1	2	2	1	2	2	2	1	3
15	2	1	3	2	2	3	2	2	1	2	2	1	2	2	2	1	3
16	1	1	2	1	2	3	2	2	3	2	2	1	2	2	2	1	2
17	3	3	1	3	2	3	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2
18	3	3	1	3	3	3	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2
19	3	2	1	3	3	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2
20	3	3	1	3	3	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2
21	3	3	1	3	3	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	2
22	3	2	2	3	3	1	1	2	1	3	1	1	1	2	2	1	2
23	3	2	2	3	3	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
24	1	3	1	3	3	2	1	2	1	1	1	1	2	3	2	3	3
25	2	3	3	2	2	2	1	2	2	2	1	3	2	3	3	3	1
26	2	3	3	1	3	2	2	1	1	3	2	3	2	3	3	3	3
27	1	3	3	2	2	2	2	2	2	1	2	3	2	3	3	3	1
28	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1
29	1	3	2	1	2	1	2	2	2	2	3	3	3	3	1	2	2
30	1	3	2	1	2	1	2	1	1	2	2	3	2	2	3	3	3
31	1	3	3	2	2	2	2	2	1	2	3	2	2	1	3	2	1

表 5 姜黄属植物数值分类的 19 个定量性状指标值

Table 5 19 quantitative characters of numerical taxonomy for *Curcuma* L.

分类运算单位 OTU	性状编号 Character number																		
	H_4	H_9	H_{10}	H_{11}	H_{18}	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{26}	H_{27}	H_{31}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	H_{38}	H_{41}	H_{42}	H_{43}	H_{45}
1	0.9	40	10	4.2	15	16	9	15	4.1	3.5	1.5	0	1.3	3	2.3	1.4	1.6	1.3	1.6
2	0.6	25	6	4.2	8	13	7	10	3.5	3.1	1.2	0	1.1	3	1.9	1.1	1.2	1.0	1.4
3	0.4	14	5	2.8	5	10	5	7	3.0	2.5	0.8	0	0.8	3	1.5	0.8	1.0	0.7	1.0
4	0.6	25	6	4.2	13	14	7	11	3.6	3.5	1.2	0	1.1	3	2.1	1.2	1.3	1.1	1.5
5	0.6	23	7	3.3	7	15	7	12	3.6	3.3	1.3	0	1.2	3	2.0	1.0	1.2	1.0	1.5
6	0.5	24	6	4.4	8	13	7	10	3.3	3.0	1.0	0	1.0	3	1.8	1.2	1.1	0.9	1.4
7	1.3	50	16	3.1	55	20	8	20	4.1	3.5	6	2.8	1.4	3	2.8	2.1	1.7	2.0	2.5
8	1.1	40	13	3.1	35	15	7	15	3.6	3.0	5	2.2	1.2	3	2.3	1.8	1.3	1.8	2.0
9	0.8	25	8	3.1	28	10	4	10	3.0	2.5	3	1.6	10.9	3	1.8	1.0	1.2	1.4	1.5
10	1.0	30	12	2.5	35	10	7	15	3.5	3.3	4	2.1	1.1	3	2.5	1.7	1.0	1.5	1.5
11	1.1	28	11	2.6	33	12	6	12	3.5	3.1	5	2.0	1.0	3	2.6	1.6	1.0	1.5	1.4
12	1.6	75	22	3.4	35	20	10	15	6.0	3.5	8	3.3	1.7	3	2.7	1.7	2.5	1.6	2.8
13	1.2	55	18	3.1	20	15	8	12	4.5	3.2	6	2.9	1.3	3	2.3	1.4	2.0	1.3	2.5
14	0.7	30	12	2.5	10	10	4	7	3.0	2.5	4	2.5	0.8	3	4.0	1.0	1.8	1.0	2.0
15	1.0	60	16	5	20	14	7	10	4.5	3.0	5	3.0	1.0	3	2.4	1.5	1.9	1.2	2.3
16	0.9	50	14	3.6	18	13	5	9	4.0	2.5	4	2.5	0.9	3	2.2	1.4	1.8	1.3	2.2

续表 5　Continued of table 5

分类运算单位 OTU	性状编号 Character number																		
	H_4	H_9	H_{10}	H_{11}	H_{18}	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{26}	H_{27}	H_{31}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	H_{38}	H_{41}	H_{42}	H_{43}	H_{45}
17	1.5	65	19	3.4	45	18	9	22	5.5	4.8	6.0	0	1.3	3	3.2	1.7	1.9	1.7	2.0
18	1.0	45	16	2.8	33	15	7	16	4.0	3.2	4.0	0	1	3	2.8	1.5	1.5	1.3	1.5
19	0.6	30	13	2.3	20	12	4	11	3.0	2.5	2.5	0	0.7	3	2.5	1.1	1.2	1.0	1.2
20	1.2	40	15	2.4	30	13	5	14	5.0	3.0	4.1	0	1.1	3	2.5	1.3	1.1	1.3	1.3
21	1.0	40	15	2.7	30	14	6	15	4.0	3.2	4.0	0	1.0	3	2.7	1.2	1.2	1.2	1.4
22	1.1	50	17	2.9	34	17	8	16	5.0	3.3	7.1	2.5	1	3	2.8	1.5	2.0	1.5	2.1
23	0.9	53	18	2.9	35	18	8	16	4.1	3.0	7.0	2.5	1.2	3	3.0	1.5	2.0	1.5	2.0
24	0.6	20	6	3.3	5	9	2	4	4.0	1.0	2.0	2.1	0.9	2	1.4	1.0	1.6	1.0	1.2
25	1.3	50	17	2.9	30	15	7	10	3.5	2.5	5.5	3.0	1.4	3	2.4	1	1	1.7	2.0
26	0.6	65	20	3.3	45	15	11	18	6.0	4.0	7.0	3	1	3	3.5	2.0	2.1	2.0	2.5
27	1.1	48	15	3.2	20	15	8	13	4.0	2.0	5	5	9	3	3.1	1.7	1.8	1.4	2.0
28	1.3	40	14	2.9	16	17	6	17	3.5	2.2	3.5	2.8	1.5	0	3.0	2.0	1.5	2.1	2.0
29	0.5	22	8	2.9	6	6	3	6	4.1	2.8	0	3.0	1.1	3	3.6	2.3	1.8	2.1	2.1
30	1.0	47	13	3.6	45	16	7	17	5.0	3.5	6.0	0	2.0	3	3.0	1.5	1.1	1.4	1.8
31	1.5	70	20	3.5	60	20	8	22	5.0	2.8	6.1	2.5	1.0	3	2.8	1.8	1.9	1.8	2.0

1.4　聚类分析

在粗糙集理论处理的基础上,按照二元性状定性指标和三元性状定性指标的约简指标值分别进行聚类,剔除不必要指标对聚类的影响。采用统计软件 SPSS13.0 计算。

2　结果与分析

2.1　定性指标的约简

利用区分函数[12]对姜黄属植物的二元性状定性指标信息值(表 3)进行运算,结果为 $\triangle = H_{12} \wedge H_{16} \wedge H_{17} \wedge H_{19} \wedge H_{30} \wedge H_{37} \wedge H_{47}$,表明这个知识表达系统只有一个约简$\{H_{12}, H_{16}, H_{17}, H_{19}, H_{30}, H_{37}, H_{47}\}$,同时也是核;$H_3$,$H_{36}$,$H_{44}$和 H_{46}指标是不必要的,其意义是对 U 对象按等价关系族 R_1 分类时,H_3,H_{36},H_{44}和 H_{46}等价关系是不必要的,按 $H_{12} \wedge H_{16} \wedge H_{17} \wedge H_{19} \wedge H_{30} \wedge H_{37} \wedge H_{47}$ 分类即可,即 $U/\{H_{12}, H_{16}, H_{17}, H_{19}, H_{30}, H_{37}, H_{47}\} = U/\{H_3, H_{12}, H_{16}, H_{17}, H_{19}, H_{30}, H_{36}, H_{37}, H_{44}, H_{46}, H_{47}\}$。

利用区分函数对姜黄属植物的三元性状定性指标信息值(表 4)进行运算,结果为 $\triangle = H_1 \wedge H_5 \wedge H_7 \wedge H_8 \wedge H_{21}$,表明这个知识表达系统只有一个约简$\{H_1, H_5, H_7, H_8, H_{21}\}$,其意义是对 U 对象按等价关系族 R_2 分类时,H_2,H_6,H_{13},H_{14},H_{15},H_{20},H_{25},H_{28},H_{29},H_{32},H_{39}和 H_{40}指标是不必要的,按 $H_1 \wedge H_5 \wedge H_7 \wedge H_8 \wedge H_{21}$ 分类即可。即 $U/\{H_1, H_5, H_7, H_8, H_{21}\} = U/\{H_1, H_2, H_5, H_6, H_7, H_8, H_{13}, H_{14}, H_{15}, H_{20}, H_{21}, H_{25}, H_{28}, H_{29}, H_{32}, H_{39}, H_{40}\}$。

通常采用聚类方法是对所有指标进行聚类,本研究在粗糙集理论处理的基础上,采用二元性状定性指标的必要指标(约简)和三元性状定性指标的必要指标(约简)分别对姜黄属植物 31 个材料进行聚类,结果表明,三元性状定性指标基本上聚合为 3 类:$A_1 = \{7,9,10,11,17,18,19,20,21,22,23,24\}$,$A_2 = \{5,12,13,14,15,16,25,26,27\}$,$A_3 = \{1,2,3,4,8,6,28,29,30,31\}$。

二元性状定性指标也基本上聚合为 3 类:$B_1 = \{1,2,3,5,6,12,13,14,15,16,22,23,26,29,30,31\}$,$B_2 = \{11,17,18,19,20,21,28\}$,$B_3 = \{4,7,8,9,10,24,25,27\}$。

从聚类结果来看,基本上将姜黄属植物性状相似的单位聚为一类,与传统分类大体一致。

将二元性状定性指标聚合的 3 类与三元性状定性指标聚合的 3 类进行合并,形成定性指标综合聚类结果,见表 6。由表 6 可知,姜黄属植物 31 个材料可分为 8 类。

表 6　姜黄属植物数值分类二元性状定性指标的分类集与三元性状定性指标分类集的交集分类结果

Table 6　Classification of intersection for aggregation with qualitative two-state character and three-state character of numerical taxonomy for *Curcuma* L.

分类集 Aggregation	A_1	A_2	A_3
B_1	$B_1 \cap A_1 = \{22,23\}$	$B_1 \cap A_2 = \{5,12,13,14,15,16,26\}$	$B_1 \cap A_3 = \{1,2,3,6,29,30,31\}$
B_2	$B_2 \cap A_1 = \{11,17,18,19,20,21\}$	$B_2 \cap A_2 = \phi$	$B_2 \cap A_3 = \{28\}$
B_3	$B_3 \cap A_1 = \{7,9,10,24\}$	$B_3 \cap A_2 = \{25,27\}$	$B_3 \cap A_3 = \{4,8\}$

2.2 定量指标的约简

根据表 5 中各项定量性状指标信息值进行布尔变量(对每一个对象的每一个定量性状赋予一个信息值),主要根据数据的集中分布特征进行分类。信息值的分级标准见表 7。根据表 7,利用表 5,形成表 8。

利用区分函数对表 8 进行运算,结果为 $\triangle = H_4 \wedge H_9 \wedge H_{10} \wedge H_{11} \wedge H_{27} \wedge H_{33} \wedge H_{38} \wedge (H_{18} \vee H_{41})$,表明这个知识表达系统有两个约简{$H_4$,$H_9$,$H_{10}$,$H_{11}$,$H_{27}$,$H_{33}$,$H_{38}$,$H_{18}$}和{$H_4$,$H_9$,$H_{10}$,$H_{11}$,$H_{27}$,$H_{33}$,$H_{38}$,$H_{41}$},{$H_4$,$H_9$,$H_{10}$,$H_{11}$,$H_{27}$,$H_{33}$,$H_{38}$}是核;$H_{22}$,$H_{23}$,$H_{24}$,$H_{26}$,$H_{31}$,$H_{34}$,$H_{35}$,$H_{42}$,$H_{43}$,$H_{45}$指标是不必要的,其意义是对 U 对象按等价关系族 R 分类时,H_{22},H_{23},H_{24},H_{26},H_{31},H_{34},H_{35},H_{42},H_{43}和 H_{45}指标是不必要的,按 $H_4 \wedge H_9 \wedge H_{10} \wedge H_{11} \wedge H_{27} \wedge H_{33} \wedge H_{38} \wedge (H_{18} \vee H_{41})$ 分类即可。即 $U/\{H_4, H_9, H_{10}, H_{11}, H_{27}, H_{33}, H_{38}, H_{18}\} = U/\{H_4, H_9, H_{10}, H_{11}, H_{18}, H_{22}, H_{23}, H_{24}, H_{26}, H_{27}, H_{31}, H_{33}, H_{34}, H_{35}, H_{38}, H_{41}, H_{42}, H_{43}, H_{45}\}$。

利用定量约简指标({H_4,H_9,H_{10},H_{11},H_{27},H_{33},H_{38},H_{18}})进行聚类,结果姜黄属植物 31 个材料基本上聚合为 4 类:D_1 = {22,23,13,25,28,12,31,7,26,8,15,16,9,27,17,30,1,29},D_2 = {19,20,10,11,18,21,14},D_3 = {24},D_4 = {2,4,6,3,5}。

从聚类结果来看,基本上将姜黄属植物性状相似的单位聚为一类,与传统分类大体一致。

表 7 姜黄属植物数值分类 19 个定量性状指标信息值的分级标准

Table 7 Grading standards of 19 quantitative characters of numerical taxonomy for *Curcuma* L.

性状编号 Character No.	指标值分级 Classification	信息值 Information value	性状编号 Character No.	指标值分级 Classification	信息值 Information value
H_4	$H_4 < 1$	1	H_{31}	$H_{31} < 3$	1
	$1 \leq H_4 \leq 1.5$	2		$3 \leq H_{31} \leq 5$	2
	$1.5 < H_4$	3		$5 < H_{31}$	3
H_9	$H_9 < 30$	1	H_{33}	$H_{33} = 0$	1
	$30 \leq H_9 \leq 60$	2		$0 \leq H_{33} \leq 3.0$	2
	$60 < H_9$	3		$3.0 < H_{33}$	3
H_{10}	$H_{10} < 10$	1	H_{34}	$H_{34} < 1.5$	1
	$10 \leq H_{10} \leq 15$	2		$1.5 \leq H_{34} \leq 2.0$	2
	$15 < H_{10}$	3		$2.0 < H_{34}$	3
H_{11}	$H_{11} < 3$	1	H_{35}	$H_{35} = 1$	1
	$3 \leq H_{11} \leq 3.5$	2		$H_{35} = 2$	2
	$3.5 < H_{11}$	3		$H_{35} = 3$	3
H_{18}	$H_{18} < 20$	1	H_{38}	$H_{38} < 2$	1
	$20 \leq H_{18} \leq 40$	2		$2 \leq H_{38} \leq 3$	2
	$40 < H_{18}$	3		$3 < H_{38}$	3
H_{22}	$H_{22} < 10$	1	H_{41}	$H_{41} < 1$	1
	$10 \leq H_{22} \leq 20$	2		$1 \leq H_{41} \leq 2$	2
	$20 < H_{22}$	3		$2 < H_{41}$	3
H_{23}	$H_{23} < 5$	1	H_{42}	$H_{42} < 1$	1
	$5 \leq H_{23} \leq 10$	2		$1 \leq H_{42} \leq 2$	2
	$10 < H_{23}$	3		$2 < H_{42}$	3
H_{24}	$H_{24} < 10$	1	H_{43}	$H_{43} < 1$	1
	$10 \leq H_{24} \leq 20$	2		$1 \leq H_{43} \leq 2$	2
	$20 < H_{24}$	3		$2 < H_{43}$	3
H_{26}	$H_{26} < 3.5$	1	H_{45}	$H_{45} < 2$	1
	$3.5 \leq H_{26} \leq 5.0$	2		$2 \leq H_{45} \leq 2.5$	2
	$5.0 < H_{26}$	3		$2.5 < H_{45}$	3
H_{27}	$H_{27} < 3.0$	1			
	$3.0 \leq H_{27} \leq 4.5$	2			
	$4.5 < H_{27}$	3			

表 8　姜黄属植物数值分类 19 个定量性状指标信息值

Table 8　Information value of 19 quantitative characters of numerical taxonomy for *Curcuma* L.

分类运算单位 OTU	性状编号 Character number																		
	H_4	H_9	H_{10}	H_{11}	H_{18}	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{26}	H_{27}	H_{31}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	H_{38}	H_{41}	H_{42}	H_{43}	H_{45}
1	1	2	2	3	1	2	2	2	2	2	1	1	1	3	2	2	2	2	1
2	1	1	1	3	1	2	2	2	2	2	1	1	1	3	1	2	2	2	1
3	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	2	2	1
4	1	1	1	3	1	2	2	2	2	2	1	1	1	3	2	2	2	2	1
5	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	1	1	1	3	2	2	2	2	1
6	1	1	1	3	1	2	2	2	1	2	1	1	1	3	1	2	2	1	1
7	2	2	3	2	3	2	2	2	2	2	3	2	1	3	2	3	2	2	2
8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2
9	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	3	3	1	2	2	2	1
10	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	1
11	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	1
12	3	3	3	2	2	2	2	2	3	2	3	3	2	3	2	2	3	2	3
13	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	1	3	2	2	2	2	2
14	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	3	3	2	2	2	2
15	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2
16	1	2	2	3	1	2	2	1	2	1	2	2	1	3	2	2	2	2	2
17	2	3	3	2	3	2	2	3	3	3	3	1	1	3	3	3	2	2	2
18	2	2	3	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	3	2	2	2	2	1
19	1	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	1	3	2	2	2	2	1
20	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	3	2	2	2	2	1
21	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	3	2	2	2	2	1
22	2	2	3	1	2	2	2	2	2	2	3	2	1	3	2	2	2	2	2
23	1	2	3	1	2	2	2	2	2	2	3	2	1	3	2	2	2	2	2
24	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1	2	2	1
25	2	2	3	1	2	2	2	2	2	1	3	2	1	3	2	2	2	2	2
26	1	3	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	1	3	3	3	2	2	2
27	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	3	3	3	3	3	2	2	2
28	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	3	2	2	2	3	2
29	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	3	3	3	2	3	2
30	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3	1	2	3	2	2	2	2	1
31	2	3	3	2	3	2	2	3	2	1	3	2	1	3	2	2	2	2	2

为了与定量指标的分类集进行合并,首先对表 6 中的小集合{22 ,23} ,{28} ,{25 ,27} ,{4 ,8}进行合并。由于在 A_1 中{22 ,23}与最近合并对象{9 ,10}相关系数为 0. 534 ,而在 B_1 中{22 ,23}与最近合并对象{29}相关系数为 0. 172 ,所以将{22 ,23}划入{7 ,9 ,10 ,24} ,即 C_1 = {7 ,9 ,10 ,24 ,22 ,23}。

同理,{28}在 A_3 中与最近合并对象{1}相关系数为 0. 15 ,而在 B_2 中与最近合并对象{17}相关系数为 0. 3 ,所以将{28}划入{11 ,17 ,18 ,19 ,20 ,21}中,即 C_2 = {11 ,17 ,18 ,19 ,20 ,21 ,28}。

同样方法进行合并可知,{25 ,27}归属于{5 ,12 ,13 ,14 ,15 ,16 ,26}中,{4 ,8}也归属于{5 ,12 ,13 ,14 ,15 ,16 ,26 }中,即 C_3 = {4 ,5 ,8 ,12 ,13 ,14 ,15 ,16 ,25 ,26 ,27 } ,C_4 = {1 ,2 ,3 ,6 ,29 ,30 ,31}。

将定性性状指标分类集与定量性状指标分类集进行交集分类,姜黄属植物 31 个材料可分为 10 类,结果见表 9。

表 9　姜黄属植物定量性状指标与定性性状指标聚类集的交集分类结果

Table 9　Classification of intersection for clustering of qualitative index and quantitative index for *Curcuma* L.

分类集 Aggregation	D_1	D_2	D_3	D_4
C_1	$C_1 \cap D_1 = \{9 ,7 ,22 ,23\}$	$C_1 \cap D_2 = \{10\}$	$C_1 \cap D_3 = \{24\}$	$C_1 \cap D_4 = \phi$
C_2	$C_2 \cap D_1 = \{17 ,28\}$	$C_2 \cap D_2 = \{11 ,19 ,18 ,20 ,21\}$	$C_2 \cap D_3 = \phi$	$C_2 \cap D_4 = \phi$
C_3	$C_3 \cap D_1 = \{15 ,12 ,13 ,16 ,8 ,25 ,26 ,27\}$	$C_3 \cap D_2 = \{14\}$	$C_3 \cap D_3 = \phi$	$C_3 \cap D_4 = \{4 ,5\}$
C_4	$C_4 \cap D_1 = \{1 ,29 ,30 ,31\}$	$C_4 \cap D_2 = \phi$	$C_4 \cap D_3 = \phi$	$C_4 \cap D_4 = \{2 ,3 ,6\}$

3 讨 论

本文在应用粗糙集理论对 47 项指标处理的基础上,利用约简后的 12 项定性性状指标综合分类和约简后的 8 项定量性状指标综合分类,并将分类集进行合并后形成 10 类(种)。这与肖小河等[2]的结果不完全一致,但在性状极为相似的单位形成的类群上极为相近,如 18,19,20,21 单位与肖小河等[2]都分别划分在一类中,还有 12,13,15,16 单位;2,3,6 单位;22,23 单位;25,27 单位都分别划分在一类中,并与传统分类[6-8,13-14]基本一致。本研究得出 21 项对分类有重要影响的指标(分类性状)为:生活状况、主根茎发达程度、根茎断面颜色、块根发达程度、叶中脉处有无紫红晕、叶鞘颜色、叶鞘有无毛、叶柄颜色、花序抽出位置、苞片有无毛、花冠筒有无毛、花期、植株高度、叶片长、叶片宽、叶片长/叶片宽、苞片宽度、小苞片有无及长度、花冠筒长、花冠侧裂片长、叶柄长,与肖小河等[2]用主成分分析得出 15 项对分类有重要影响的指标相比,两者有 10 项指标相同。

从方法角度而言,主成分分析易造成信息丢失;定性指标与定量指标不加区分、重要指标与非重要指标不加区分的完全聚类是不科学的;而粗糙集理论对于分类指标的处理,一方面去掉了对分类没有显著作用的指标,减少了运算;另一方面减少了不必要指标对分类的影响,使分类更为准确。粗糙集理论与聚类分析法结合运用是合理的,其在植物数值分类中的应用为姜黄属植物数值分类学研究提供了一条可参考的新方法。

[参考文献]

[1] 肖小河,苏中武. 姜黄属药用植物研究进展[J]. 中草药,1997,28(2):114-119.

[2] 肖小河,钟国跃,舒光明,等. 国产姜黄属药用植物的数值分类学研究[J]. 中国中药杂志,2004,29(1):15-23.

[3] 徐克学. 生物数学[M]. 北京:科学出版社,2001:51-63.

[4] 刘 清,黄兆华,姚力文. Rough 集理论:现状与前景[J]. 计算机科学,1997,24(4):1-5.

[5] 刘开第,郭 奇,王义闹. Rough Set 理论及其应用[J]. 河北建筑科技学院学报,2001,18(2):51-55.

[6] 童绍全. 云南姜科新植物[J]. 云南植物研究,1986,8(1):37-44.

[7] 刘 念,陈升振. 中国姜黄属二新种[J]. 广西植物,1987,7(1):15-18.

[8] 张 浩,焦文旭,方忻平. 四川姜黄属一新种[J]. 华西医科大学学报,1990,21(2):179-180.

[9] 吴征镒. 论中国植物区系的分区问题[C]//中国植物学会. 中国植物学会三十年年会论文摘要汇编. 北京:科学出版社,1963b:153.

[10] 张文修,吴伟志. 粗糙集理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2001:22-23.

[11] 苗夺谦,胡桂荣. 知识约简的一种启发式算法[J]. 计算机研究与发展,1999,36(6):681-684.

[12] 陶 志,许宝栋,赵春元. 基于区分函数与强等价集理论的属性约简算法[J]. 中山大学学报:自然科学版,2004,43(2):13-17.

[13] 中国植物志编辑委员会. 中国植物志(16 卷 第二册)[M]. 北京:科学出版社,1981:59.

[14] 中国科学院昆明植物研究所. 云南植物志(8 卷)[M]. 北京:科学出版社,1997:584-592.